



Com és un estel?

Joan Antoni Miralles

ja.miralles@ua.es
Dept. Física Aplicada, Universitat d'Alacant

Si una nit clara, sense Luna i allunyats de les llums de les ciutats mirem al cel podrem contemplar un espectacle meravellós que ha motivat al llarg de segles l'interès de la humanitat per explorar i entendre la natura. El mètode científic, tal com ara l'entendem, es va aplicar per primera vegada a l'astronomia.

La imatge mostra la constel·lació d'Orió. En ella situaven els nostres avantpassats a un ser mitològic. L'estel situat dalt a l'esquerra s'anomena Betelgeuse, és roja, i la situada baix a la dreta és Rigel, de coloració blavosa. Els tres estels alineats al mig de la imatge formen el cinturó d'Orió. Es pot apreciar també nebuloses, com la situada baix del cinturó, a l'espasa, anomenada nebulosa d'Orió, on hi ha evidències de que s'estan formant estels.

Actualment es pensa que els estels es formen a partir de núvols gegants de gas i pols formats principalment per hidrogen molecular. La temperatura d'aquestes regions és al voltant de 10 K (263°C) i la densitat és de l'ordre de 1000 molècules per centí-





metre cúbic (hi ha que pensar que un centímetre cúbic d'aire a la Terra conté unes 3×10^{19} molècules).

En aquestes regions molt fredes, la pressió que fan les molècules es baixa i és fàcil que, en comprimir-se lleugerament, la força de la gravetat acabe per fer col·lapsar part del núvol. Una vegada comença el col·lapse, es produeix una fragmentació i cada fragment es contrau per separat. En contraure's, la temperatura i la densitat de cada fragment augmenta i això fa que la pressió també augmente fins que l'estel arriba a una situació en que la força de la gravetat equilibra la força de la pressió. S'ha format un objecte en equilibri hidrostàtic que s'anomena proto-estel. La diferència entre aquest objecte i un estel vertader és que en un proto-estel l'energia emesa s'obté de l'energia gravitatòria i no de les reaccions nuclears. El comportament termodinàmic d'aquest objecte resulta ser completament diferent al que estem habituats en objectes a la Terra. Així, si un objecte a la Terra emet energia, l'objecte es refreda ja que la capacitat calorífica de l'objecte es positiva. En un proto-estel, però, el comportament és justament l'oposat. A mesura que emet energia per la superfície, es va escalfant. El comportament paradoxal es causat per la contracció que provoca un treball sobre el sistema de manera que l'energia gravitatòria perduda en la contracció és la responsable de l'augment de temperatura. El sistema actua com si la capacitat calorífica fóra negativa. Aquest fet condueix a que l'evolució posterior faça que s'assolesquen temperatures suficientment altes per que es produeixen reaccions nuclears, les quals proporcionen l'energia que emet l'estel i la contracció s'atura: s'ha format un estel.

Una vegada formats alguns estels en el núvol, la radiació que emeten pot provocar compressions d'altres parts del núvol que desencadenen la formació de nous estels. La nebulosa d'Orió en les voreres d'un d'aquests núvols és un exemple.

A més, la radiació dels estels produeix l'expulsió de la major part del gas i pols de la nebulosa original i els estels es fan visibles des de la Terra. Un exemple de formació estel·lar relativament recent si es compara amb l'edat d'altres objectes celests, és el cúmulo de les Plèiades, a uns 400 a. l. de la Terra, on es pot apreciar encara restes del núvol original que reflecteixen la llum dels estels. Aquest cúmulo consta d'uns 500 membres i s'estima que es va formar fa uns 50 milions d'anys.



La font d'energia que fa que els estels brillen per períodes de temps tan llargs com milers de milions d'anys no va ser descoberta fins al final dels anys 30. Avui en dia sabem que al interior dels estels es produeixen reaccions nuclears de fusió que proporcionen l'energia que un estel emet per la superfície. Els estels comencen la seua vida transformant hidrogen en heli, alliberant



una energia d'uns 100 milions de quilocalories per cada gram d'hidrogen transformat. Per obtenir aquesta energia faria falta cremar 20 tones de carbó. La temperatura a l'interior dels estels per que es produeixen les reaccions nuclears que transformen hidrogen en heli és d'unes desenes de milions de graus.

Una vegada transformat part de l'hidrogen en heli, pot ocórrer un augment de temperatura per compressió i l'heli pot començar a reaccionar transformant-se en carboni. El carboni pot produir oxigen, magnesi, neó, silici i altres elements.

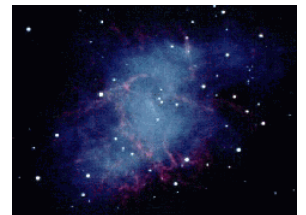
El procés pot continuar fins a arribar als elements més estables i així, al mateix temps que s'extrau energia es van formant nous elements. L'oxigen de l'aigua, el calci dels nostres ossos, el ferro de la hemoglobina de la sang, etc. s'han format a l'interior dels estels.

Un estel com el nostre Sol triga uns 10.000 milions d'anys en consumir l'hidrogen. Quan comença a 'cremar' heli, després d'una fase transitòria, la temperatura al centre de l'estel és d'uns 200 milions de graus i la densitat és d'uns 10 kg/cm³. El radi en eixe moment és de 10 milions km, quasi 15 vegades el radi actual del Sol. L'energia emesa pel Sol és 100 vegades la que emet el Sol actualment (hi ha que pensar que si l'energia emesa augmenta al doble de la actual, l'aigua a la Terra s'evaporaria). La temperatura a la superfície, però, es redueix a uns 5000 K i l'estel apareix més roig.

El cremat de l'heli produeix carboni al centre i l'estel es fa cada vegada més lluminós i més roig. L'embolcall de l'estel és expulsada i es produeix una nebulosa planetària, que deixa al descobert el nucli de l'estel, més calent i dens. Aquest objecte central, que típicament té un radi d'uns milers de quilòmetres i una densitat central de desenes de tones per cm³ i massa menor que la massa del Sol, s'anomena nana blanca. Quan es formen, tenen temperatures a la superfície al voltant de 50.000 K però a poc a poc la temperatura va disminuint fins convertir-se en nanes negres. Per tant, el destí final del Sol serà una nana blanca de carboni ja que no s'arribarà a temperatures suficientment altes per cremar el carboni.

L'evolució d'un estel massiu és molt més ràpida, més intensa i amb un final més violent. Així, un estel de massa 25 vegades la del Sol, triga uns 10 milions d'anys en cremar l'hidrogen i 1 milió d'anys en cremar l'heli, 100.000 anys en cremar carboni, 10 000 anys en cremar l'oxigen i 1 dia en cremar el silici per produir ferro al centre. L'estructura de l'estel és tipus pell de ceba ja que té capes de diferents elements. El nucli interior de ferro es farà inestable quan la massa arribe a ser de una a dos vegades la del Sol. Quan això ocorre, el nucli intern té un radi d'uns 1.000 km, una temperatura al centre de 1000 milions de graus i una densitat de 1.000 tones per cm³.

En unes dècimes de segon, tot el nucli interior de l'estel col·lapsa. Quan a la zona central la densitat, que va augmentant a causa del col·lapse, arriba a superar la densitat del nucli atòmic, es a dir superiors a 100 milions de tones per cm³, les forces nuclears fan que el material rebote, produint-se una ona de xoc que eventualment expulsarà tot el material que hi ha per damunt a velocitats de milers de quilòmetres per segon, deixant al centre un objecte a densitats lleugerament superiors a la de la matèria nuclear, que emet una gran quantitat de neutrins durant un període d'uns 20 segons al mateix temps que es refreda. S'ha produït una explosió supernova i s'ha format un estel de neutrons. Si, per alguna





causa, l'ona de xoc no pot expulsar suficient material, no es formarà un estel de neutrons sinó un forat negre ja que no poden haver estels de neutrons amb masses superiors a una certa massa (al voltant de 2 vegades la massa del Sol).